

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. профессора Головина Юрия Ивановича на диссертацию Ерохина Виктора Васильевича «Органические мемристорные приборы и нейроморфные системы» представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АКТУАЛЬНОСТЬ

Мемристорные устройства - «резисторы с памятью» - рассматриваются в качестве электронных аналогов синапса в электронных сетях. С 2008 года число публикаций и цитирований в этой области растет экспоненциально. В настоящее время такие работы ведутся в исследовательских институтах и промышленных компаниях в России, США, Европе, Японии, Корее, Китае. Большинство работ в этой области основано на использовании неорганических материалов.

В.В. Ерохин предложил использовать для получения мемристоров органические материалы, которые имеют ряд преимуществ. Они позволяют обеспечить низкую себестоимость производства, малый вес изделий, низкое энергопотребление, возможность реализации гибких схем и т. д. Мемристорные приборы на основе органических материалов обладают способностью формировать 3D-сети методом самоорганизации.

Новые подходы, связанные с построением органических мемристорных приборов, очень важны для практических приложений. Разработанные сложные трехмерные системы и методы их обучения являются уникальными и представляют отдельную ценность. В этой связи, актуальность темы диссертационной работы Ерохина В.В. не вызывает сомнений.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Впервые реализован органический мемристорный прибор с выпрямляющими свойствами и гистерезисом вольт-амперной характеристики. Переключение проводимости осуществляется в активной зоне контакта проводящего полимера и твердого электролита. Детальные исследования

различными методами позволили определить физику механизма работы устройства.

Впервые мемристорный прибор использован диссертантом для реализации генератора автоколебаний. Реализация такого режима стала возможной благодаря предложенной и разработанной модели, допускающей автоколебательный процесс в случае возможности накопления заряда на электроде сравнения.

Для выявления физических механизмов работы устройства были применены различные методы оптической спектроскопии и рентгеновской флуоресценции. На базе полученных экспериментальных данных была построена математическая модель, описывающая работу устройства в режиме генератора автоколебаний и имеющая вольт-амперные характеристики, близкие к экспериментальным. Нужно подчеркнуть, что были получены зависимости корреляции проводимости прибора с его спектральными свойствами.

Впервые изготовлен и исследован электронный аналог участка нервной системы улитки. При этом, электронная цепь воспроизводила не только архитектуру данного участка, но и его свойства.

Логические элементы с памятью, реализованные на основе органических мемристорных приборов, обеспечивали проведение операций, зависящих не только от величин входных сигналов, но и от предыдущей работы данного элемента.

Впервые реализованы и исследованы стохастические трехмерные сети со случайными связями элементов. Данные системы были получены методом самоорганизации сополимеров. Было показано, что свойства таких систем определяются примененными алгоритмами обучения.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Разработан, реализован и исследован органический мемристорный прибор – ключевой элемент перестраиваемых и нейроморфных систем.

Основываясь на всестороннем исследовании с помощью методов оптической спектроскопии, рентгеновской флуоресценции и исследовании электрических и оптических характеристик, была разработана модель работы

устройства, которая позволила оптимизировать функциональные характеристики приборов и производить расчет свойств систем на их основе.

Логические элементы с памятью могут быть использованы при разработке «процессоров с памятью», широко обсуждаемых в настоящее время.

Предложенный и исследованный режим работы мемристора в качестве генератора автоколебаний представляет практическую ценность для реализации биоподобных систем обработки информации, выполняя роль генератора тактовой частоты

Реализация электронного аналога участка нервной системы улитки, в которой воспроизводятся не только структура сети, но и ее свойства, может быть использована для создания модельных систем более сложных биологических объектов.

Разработанный метод исследования с использованием рентгеновской флуоресценции может быть использован для изучения любых систем, предполагающих пространственное перемещение ионов в процессе работы.

Уникальные трехмерные системы со стохастической организацией, реализованные в рамках данной диссертационной работы, являются принципиально новыми объектами, свойства которых зависят не столько от метода их приготовления, сколько от использованного алгоритма обучения.

Результаты работы могут быть использованы в научных центрах, работающих в области мемристорных приборов и нейроморфных систем, таких как НЦ Курчатовский институт, МИФИ, МИЭТ, Казанский Федеральный Университет.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация Ерохина В.В. состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы из 349 наименований. Общий объем диссертации составляет 329 страниц, в том числе 126 рисунков и 10 таблиц.

Во **введении** автор в общем виде определяет объекты исследования и формулирует проблему. В **первой главе** рассматриваются различные мемристорные устройства, обосновывается актуальность темы и ставятся

цели и задачи. **Вторая глава** посвящена детальному описанию методов реализации, исследованию механизма работы и свойств полученных приборов. Важно отметить, что показанная связь электрических и оптических свойств системы открывает большие возможности бесконтактного контроля состояния системы. В **третьей главе** описывается работа органического мемристорного прибора в режиме генератора автоколебаний. Возникновение автоколебаний связано с накоплением заряда в цепи электрода сравнения. В **четвертой главе** описаны системы с наперед заданной архитектурой. Сеть из 8 приборов продемонстрировала возможность обучения: связи между парами Вход-Выход были наведены путем приложения определенных напряжений, переводящих цепи в проводящее или диэлектрическое состояние. Впервые реализована цепь, имитирующая участок нервной системы улитки. В **пятой главе** описываются логические элементы с памятью: И, ИЛИ и НЕ, выходной сигнал которых определяется не только конфигурацией входных сигналов, но и «памятью» о предыдущих событиях. В **шестой главе** описаны трехмерные системы со случайными связями между элементами. Наведение краткосрочных и устойчивых связей в этих системах зависело от метода обучения, который к ним применялся. В **заключении** автор формулирует основные результаты и выводы диссертации.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность полученных результатов гарантируется соответствием полученных экспериментальных данных с результатами моделирования, а также многочисленными цитированиями работ другими авторами.

Результаты диссертации изложены в 53 публикациях в журналах, индексируемых базами данных ISI Web of Science и Scopus, а также в 5 главах в монографиях. Автор неоднократно докладывал результаты диссертационной работы на международных конференциях: UC09 (приглашенный доклад); Nano-Ne 2009, 17 международная IEEE конференция по электронике, цепям и системам; ICECS 2010, Симпозиум Альфреда Нобеля (Alfred Nobel Symposium), 3M: Машины, молекулы мышление (приглашенный доклад); ECOF12 (приглашенный доклад); Международный симпозиум IEEE по мемристорам Турин, Италия, 5 декабря, 2011; ICNAAM, 10 Международная

конференция по численному анализу и прикладной математике; Научный симпозиум Российской Академии Наук «Память в биологических, социальных и технических системах», Курчатовский Институт, Москва, 2-3 апреля, 2013; 2013 IEEE 20 Международная конференция по Электронике, Цепям и Системам (ICECS); ICNAAM 12 (два приглашенных доклада на разных симпозиумах); EMRS 2014; Международная конференция по механике – Седьмые Поляховские чтения, Ст. Петербург, Россия, 2-6 февраля, 2015 (пленарная лекция); MEMRISYS 2015; Международная конференция «Актуальные проблемы механики», Санкт-Петербург, Россия, 25 июня -01 июля 2016 (пленарная лекция).

Таким образом, представленные к защите результаты прошли широкую апробацию в российском и международном научном сообществе.

ОБЩАЯ ОЦЕНКА ДИССЕРТАЦИИ И ЗАМЕЧАНИЯ

Диссертационная работа Ерохина В. В. представляет собой логичную законченную работу, которая открывает новое направление науки и техники. Она написана ясно и последовательно, представленные результаты подробно и четко изложены. Все результаты получены автором лично. Оформление диссертации соответствует принятым правилам и стандартам. Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований по объему и структуре, полно и точно отражает содержание рассматриваемой диссертационной работы.

Между тем, необходимо сделать некоторые замечания.

1. В диссертации автор практически нигде не использует термин «мемристор», описывая результаты своего исследования, употребляя термин «мемристорный прибор» или «мемристорное устройство» В чем причина употребления такой терминологии?
2. В конце второй главы автор приводит данные о возможности работы устройства, канал которого изготовлен методом «слой-за-слоем», в контакте с биологическими молекулами в физиологической среде. Есть ли какие-либо результаты, подтверждающие данное утверждение экспериментально?

3. Нигде не обсуждается частотный диапазон генерации колебаний, которые можно реализовать в разработанных устройствах, и предельно достижимое быстродействие разработанных мемристорных систем. Как оно может зависеть от дизайна, размеров, температуры и состава окружающей среды?
4. Также отсутствует оценка вероятного ресурса этих устройств или скорости их деградации при различных условиях эксплуатации.
5. Нигде не проводится сравнений характеристик разработанных мемристорных приборов и систем с их биофизическими аналогами в живой природе.
6. Рисунки в автореферате настолько мелки, что на них невозможно разглядеть некоторые подписи и цифры.
7. На рисунке 1 в автореферате не показана масштабная линейка или отрезок, в результате чего нельзя оценить реальные размеры объекта.
8. Рисунок 3.2: временная шкала (с) отличается от (а) и (в).

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы В.В. Ерохина и по большей части носят характер пожеланий или указаний на технические или оформительские недочеты.

Отмечу, что и тема диссертационной работы, и большинство полученных результатов, открывающих перспективы использования результатов в таких областях, как физика конденсированного состояния, нетрадиционные системы обработки информации и нейроморфные системы, несомненно носят пионерский характер.

Результаты проведенных автором диссертации исследований представляют несомненную ценность и высокую научную значимость для понимания физических процессов в гетероструктурах проводящий полимер – твердый электролит; для реализации нейроморфных систем с использованием электронных элементов со свойствами синапсов, для построения искусственных нейронных сетей и моделирования отдельных участков нервной системы живых существ.

